УДК 621.793

ПОЛУЧЕНИЕ, МОРФОЛОГИЯ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК И НАНОЧАСТИЦ СВИНЕЦСОДЕРЖАЩИХ ПЕРОВСКИТОВ, ИНКАПСУЛИРОВАННЫХ В ПОЛИМЕРНУЮ ОБОЛОЧКУ

В. С. Будник, У. Е. Гога, А. А. Позняк

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь

В данной работе предлагается упрощенный и экономичный синтез перовскитов состава $CsPbI_3$, инкапсулированных в полимерную матрицу (ПИПМ), методом замены растворителя в атмосфере воздуха при комнатной температуре. Проведено исследование фотолюминесценции и морфологии полученных систем. Методом сканирующей электронной микроскопии выявлено формирование анизотропных 1D-наноструктур с развитой поверхностью в составе ПИПМ.

Исследовано влияние модификации жидкофазного прекурсора органическими аммониевыми катионами (RNH_3^+) с различными заместителями R на структуру поверхности и оптические свойства монохлорзамещенных органо-неорганических перовскитов состава $CH_3NH_3PbI_2Cl$. Показано, что наиболее интенсивным оптическим поглощением характеризуется перовскит, содержащий этилендиаммониевый катион. Сформированная пористая наноструктура перспективна для создания оптоэлектронных устройств с развитой площадью гетероперехода. Установлено, что из числа исследованных смешанных органо-неорганических перовскитов наиболее перспективным материалом для создания фотовольтаических ячеек с максимальным коэффициентом полезного действия (КПД) является перовскит, модифицированный этилендиаммониевым катионом.

Ключевые слова: атмосфера воздуха, 1D наноструктура, морфология, развитая поверхность, фотолюминесценция, неорганический перовскит, органо-неорганический перовскит, алкил- и ариламмониевые катионы, оптические свойства

PREPARATION, MORPHOLOGY AND OPTICAL ROPERTIES OF FILMS AND NANOPARTICLES OF LEAD-CONTAINING PEROVSKITES ENCAPSULATED IN A POLYMER SHELL

V. S. Budnik, U. Y. Goga, A. A. Poznyak

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus

This work proposes a simplified and cost-effective synthesis of $CsPbI_3$ perovskites encapsulated in a polymer matrix (PEPM) via a solvent-exchange method in ambient air at room temperature. The photoluminescence and morphology of the resulting structures were investigated. Scanning electron microscopy revealed the formation of anisotropic 1D nanostructures with a high surface-to-volume ratio within the PEPM composite.

The effect of modifying the liquid-phase precursor with organic ammonium cations (RNH_3^+) bearing various R substituents on the surface structure and optical properties of monochlorinated organometallic $CH_3NH_3PbI_2Cl$ perovskites was investigate. It is demonstrated that the perovskite containing the ethylenediammonium cation exhibits the most intense optical absorbance. The formed nanostructure holds great promise for the development of optoelectronic devices with an expanded heterojunction area. Among the investigated mixed organometallic perovskites, the one modified with the ethylenediammonium cation is identified as the most promising candidate for fabricating photovoltaic cells with maximum power conversion efficiency (PCE).

Keywords: ambient air, 1D nanostructures, morphology, high surface-to-volume ratio, photoluminescence, inorganic perovskite, organo-inorganic perovskite, alkyl- and arylammonium cations, optical properties

E-mail: poznyak@bsuir.by

ВВЕДЕНИЕ

Исследование нанокристаллов перовскитов состава $CsPbI_3$ находится на острие современных материаловедческих исследований [1]. Эта междисциплинарная тема соответствует глобальным тенденциям, но при этом имеется ряд проблем, требующих фундаментальных решений, связанных с возможностью внедрения новых подходов к синтезу материалов с заданными свойствами и формированию активных элементов устройств. Особенно остро стоят вопросы нестабильности нанокристаллов перовскита по отношению к атмосферным условиям и быстрой деградации с потерей фотоактивных свойств [2; 3]. Изучение механизмов деградации и разработка методов инкапсуляции нанокристаллов перовскитов открывает широкие возможности для стабилизации их свойств в связи с появлением новых материалов. Стабилизация перовскитов путем инкапсуляции в полимерную матрицу и изучение фотоактивных свойств таких нанокомпозитов являются одними из ключевых направлений для исследований, открывающих новые возможности для промышленного внедрения. В качестве полимерной составляющей особое внимание привлекает целлюлоза — один из самых распространенных природных полимеров, а также ее нетоксичные производные, применение которых экологически безопасно.

Внимание ученых и специалистов уже давно привлечено к разработке эффективных способов преобразования солнечной энергии в электроэнергию. Повышенный интерес к фотоэлектрическому методу обусловлен реальной возможностью создания относительно стабильных в эксплуатации, недорогих и простых в изготовлении солнечных элементов с относительно высоким коэффициентом преобразования энергии. Именно по этим причинам в фотовольтаике востребованы гибридные органо-неорганические перовскитные солнечные элементы (ПСЭ). Главными характеристиками, требующими внимательного исследования, являются морфологические и оптические свойства, влияющие на эффективность работы перовскитных элементов [4].

Управляемая кристаллизация имеет практическое значение для получения высококачественных тонких пленок перовскита с уменьшенным количеством структурных дефектов. Доноры электронных пар, такие как азот, кислород и сера, в качестве посторонних добавок координируются с катионами свинца в перовскитах и значительно влияют на латеральный рост кристаллитов. В некоторых исследованиях для морфологической регуляции тонких пленок перовскита использовались амины с многоатомными углеводородными хвостами, однако данные соединения показали неудовлетворительные результаты [5].

Перовскитные пленки, модифицированные N- и O-донорами, демонстрируют более упорядоченную морфологию вместе с повышенной кристалличностью и размером зерен. Остаточные молекулы пассивируют мелкие дефекты в границах зерен и приводят к подавлению рекомбинации носителей заряда [6; 7].

В предлагаемой работе исследована возможность создания нанокомпозитных материалов, представляющих собой нанокристаллы перовскита состава $CsPbI_3$, инкапсулированные в полимерную матрицу с целью препятствования их агломерации, химической стабилизации, предотвращения деградации перовскита и итогового ухудшения функциональных свойств материала. Другая часть работы посвящена подбору оптимального состава смешанных органо-неорганических перовскитов с целью увеличения оптического поглощения путем модификации $CH_3NH_3PbI_2Cl$ добавками солей других органических аминов.

МЕТОДИКА СИНТЕЗА

Методом замены растворителя получили перовскиты, инкапсулированные в полимерную матрицу (ПИПМ), состава $CsPbI_3$ на основе следующих реактивов: растворитель — диметилформамид (*DMF*), поверхностностно-активные вещества (ПАВ) — додециламин (*DDA*) и олеиновая кислота (*OA*), в качестве антирастворителя выступал этилацетат (*EA*). Соотношение прекурсоров Cs:Pb=2:1. 300 мкл прекурсорного раствора по каплям добавляли в 5 мл *EA*, в котором предварительно был растворен 1 % (от веса прекурсоров) нитроцеллюлозы (НЦ). Центрифугирование для отделения более крупных частиц и непрореагировавших компонентов проводилось при 3500 оборотах в минуту в течение 15 мин.

Полученный состав был нанесен на стекло для оценки морфологии посредством сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на электронном микроскопе *Hitachi S*4800. Регистрация спектра фотолюминесценции ПИПМ проводилась на лазерном спектральном измерительном комплексе на основе монохроматора спектрографа *Solar TII MS* 7504*i* при комнатной температуре. Длина волны возбуждения составляла 360 нм.

Также исследовали влияние введения азотсодержащих катионов состава RNH_3^+ в жидкофазный прекурсор на структуру и оптические свойства пленок монохлорзамещенного гибридного органо-неорганическиого перовскита состава $CH_3NH_3PbI_2Cl$. Пленки толщиной 0,8–1,0 мкм были получены центрифугированием (500 оборотов в минуту) с последующим отжигом при T=100 °C в течение 5 мин. Раствор перовскита, концентрация которого составила 60 г/л, получали смешиванием хлорида метиламмония (CH_3NH_3Cl) с йодидом свинца(II) PbI_2 (молярное соотношение компонентов 1:1) в диметилформамиде, иодиды аммония (NH_4I), фениламмония ($C_6H_5NH_3I$), моноэтаноламмония ($HOC_2H_4NH_3I$) и этилендиаммония ($IH_3NC_2H_4NH_3I$) (концентрации соответствующих йодидаммониевых солей С равны 10 г/л) добавляли при перемешивании. Спектры светопропускания (T, %) и оптической плотности (D) снимали на спектрофотометре МС122: для T в области длин волн (λ) 330–1000 нм, для D — в области (λ) 380–1000 нм. Морфология поверхности пленок перовскита была исследована с помощью оптического микроскопа МКИ2М. Воспроизводимость светопропускания при исследовании образцов оценивалась по измерениям в пяти точках: центральной и четырем крайним. Погрешность составила $\Delta X = \pm 0{,}1$ %. Это свидетельствует о достаточно высокой повторяемости измеряемых параметров.

Все спектральные характеристики были обработаны с помощью программы *OriginPro* 2018 (64 *bit*) *SR*1.

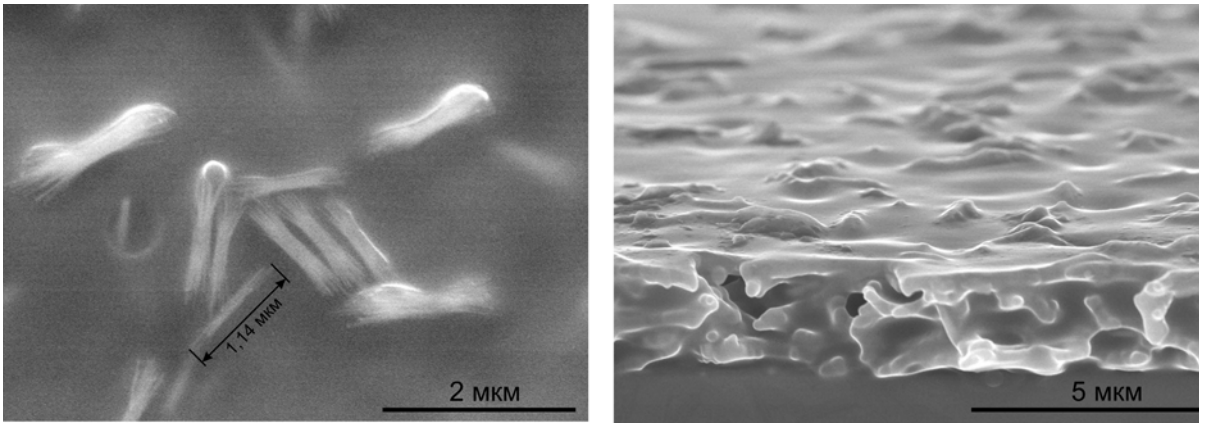
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате СЭМ-исследований полученных ПИПМ (рисунок 1) видны следующие особенности. На рисунке 1 а (микрофотография поверхности образца) мы видим вытянутые частицы, имеющие большое аспектное отношение, что дает нам право говорить о формировании анизотропных одномерных (1*D*) наноструктур перовскита, равномерно распределенных и интегрированных в сплошную полимерную матрицу НЦ. Наблюдаемые на поверхности сходные по внешнему виду снопообразные объекты демонстрируют два основных типа морфологии. Первый тип представлен характерными субмикронными

пучками, состоящими из плотных нитей, которые берут начало из единого центра кристаллизации и частично расходятся на свободном конце. Второй тип морфологии включает изолированные индивидуальные «нанопалочки», тесно расположенные преимущественно параллельно друг другу без образования общих ядер нуклеации и расходящиеся на обоих концах «снопа». Продольный размер данных наноструктур составляет порядка 1,1–1,2 мкм, в то время как толщина индивидуальных нитей находится в нанодиапазоне, что обеспечивает высокое аспектное отношение. После полного испарения антирастворителя (*EA*) частицы не объединяются в единый кристалл и не образуют сплошную пленку, а сохраняют свою индивидуальность, оставаясь в виде отдельных нитей.

Сосуществование пучковых и изолированных параллельных наноструктур указывает на флуктуации локального пересыщения в многокомпонентной системе при центрифугировании. В зонах повышенной концентрации прекурсоров реализуется механизм полицентрического роста из единого зародыша, тогда как в более разбавленных областях протекает независимый направленный рост индивидуальных кристаллов. При этом совместное присутствие нитроцеллюлозы и амфифильных лигандов (*OA* и *DDA*) в обоих случаях создает стерические препятствия, жестко ограничивая латеральный рост и стимулируя вытягивание кристаллов вдоль одной оси.

На микрофотографии поперечного скола (рисунок 1 б) отчетливо видна внутренняя трехмерная морфология сформированного нанокомпозита. Пленка общей толщиной порядка 2,5–3,0 мкм обладает развитой пористой («губчатой») структурой с системой взаимосвязанных полостей и арок. Формирование такой мезопористой топологии обусловлено процессами локального фазового разделения в многокомпонентной системе при центрифугировании. Скоростное испарение летучего антирастворителя (*EA*) индуцирует мгновенную фиксацию жесткого полимерного каркаса нитроцеллюлозы, внутри порового пространства которого протекает контролируемый рост анизотропных кристаллов перовскита. Таким образом, НЦ не только эффективно предотвращает агломерацию частиц, но и способствует созданию условий для их изолированного роста. Известно, что *DDA* ответственен за продольные размеры кристалла, а олеиновая кислота — за поперечные (толщину) [8]. В связи в тем, что *DDA* крайне гигроскопичен и плавится при 27 °С, необходим точный контроль фактической массы при добавлении его на этапе синтеза. Таким образом, при изменении общего количества ПАВ и их соотношения можно контролировать геометрические параметры получаемых кристаллов. Подобная развитая пористая морфология с инкапсулированными 1*D*-наноструктурами представляется нам перспективной для создания оптоэлектронных устройств с развитой площадью гетероперехода.



а б

а — поверхность; б — скол

Рисунок 1 — СЭМ-изображения полученных ПИПМ

Сразу после синтеза раствор приобретает насыщенный коричневато-янтарный цвет (рисунок 2) при дневном освещении, а также наблюдается яркая зеленая люминесценция под УФ-лампой. Похожий эффект наблюдался ранее при изготовлении перовскитов смешанного бромидно-йодидного состава при небольшой повышенной температуре синтеза (≈180 °C) [9], однако при остывании цвет раствора изменялся на желтый. ПИПМ-состав не подвергался дополнительной температурной обработке. Показательное сохранение цвета получаемого раствора может указывать на дополнительные стабилизирующие свойства НЦ, добавленной в процессе синтеза.



Рисунок 2 — Фотография коллоидного раствора ПИПМ при дневном свете (слева) и при УФ-облучении (справа)

Кроме того, был получен спектр фотолюминесценции жидкой фазы ПИПМ композитной системы, полученной методом жидкофазного осаждения в присутствии НЦ при длине волны возбуждения λ_{ex} 360 нм (рисунок 3). Исходный спектр довольно сильно зашумлен, поэтому для сглаживания кривой был использован метод Савицкого – Голея.

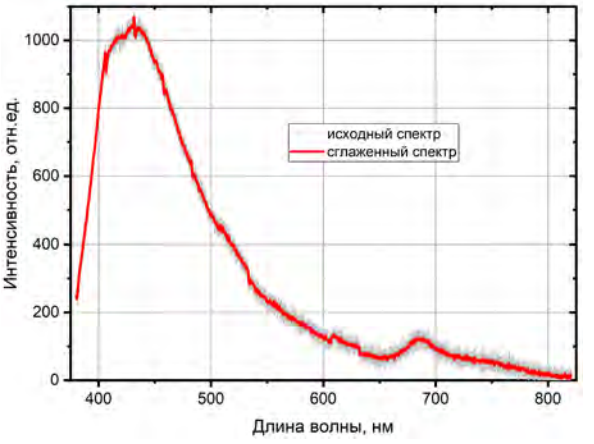


Рисунок 3 — Спектр фотолюминесценции раствора ПИПМ после синтеза

На этом спектре фиксируется сосуществование нескольких источников свечения. Высокоинтенсивный асимметричный пик с максимумом при 426 нм обусловлен эмиссией растворимых молекулярных галогенидных комплексов свинца $[PbI_n]^{2-n}$, выступающих в роли прекурсоров кристаллизации. Слабоинтенсивная и относительно широкая полоса в длинноволновой области (≈685 нм) обусловлена характеристической экситонной люминесценцией зарождающейся фазы наночастиц перовскита $\alpha CsPbI_3$.

Возвращаясь к рисунку 2, заметим, что коричневато-янтарный оттенок, который имеет при дневном свете прозрачный раствор, подтверждает преобладание молекулярно-кластерной фракции свинца и отсутствие крупных рассеивающих коллоидов. При облучении ультрафиолетом наблюдается интенсивное зеленое свечение жидкой фазы. Данный эффект обусловлен комбинацией субтрактивной фильтрации (поглощением синего излучения 426 нм желтой матрицей раствора) и зарождением ультрамалых, квантово-ограниченных наноструктур промежуточного состава (предположительно, фазы Cs_4PbI_6).

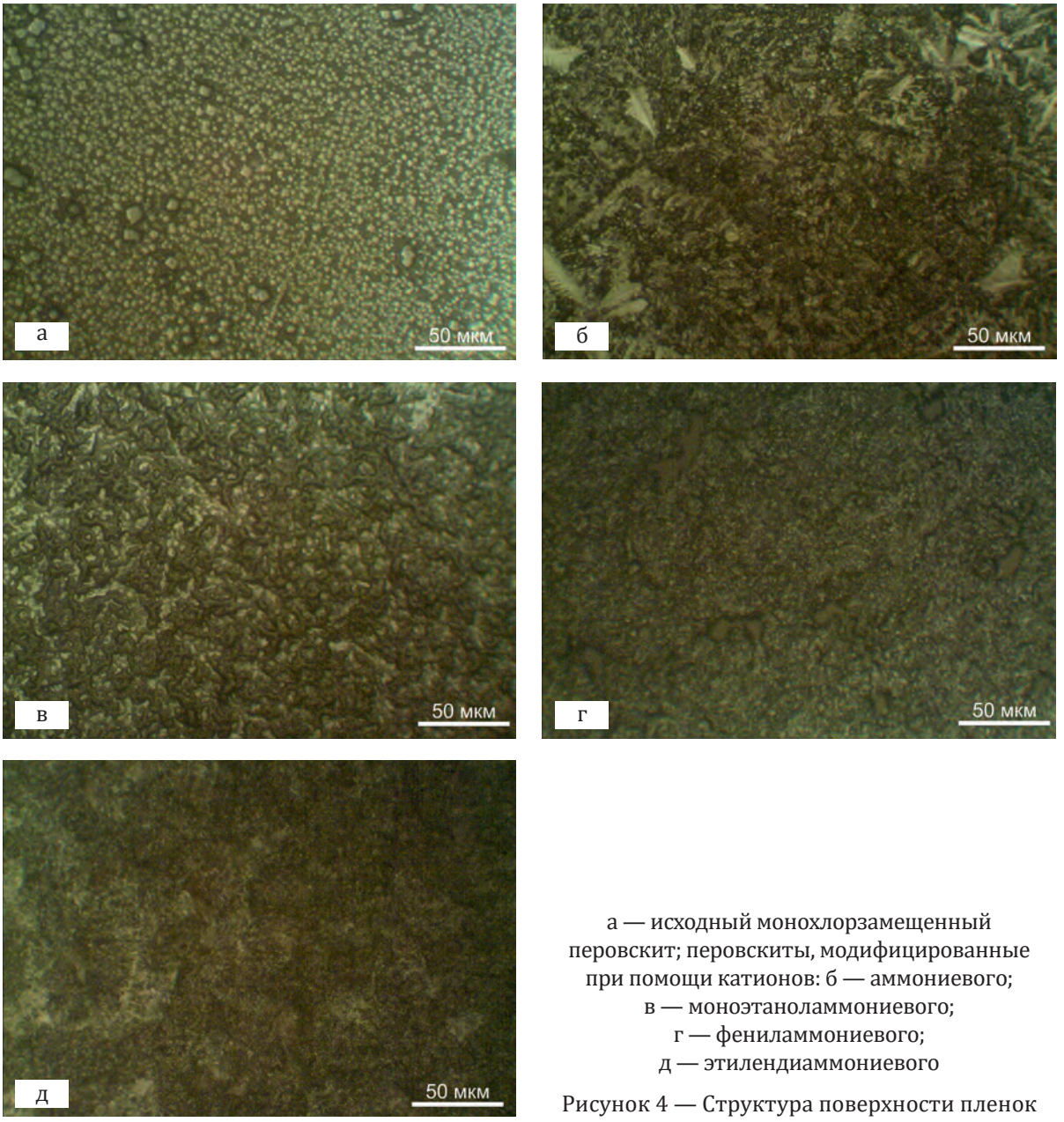
Высокий барьер нуклеации и подавление роста крупных кристаллов $CsPbI_3$ обусловлены синергетическим действием стабилизирующей системы. Избыток цезия (соотношение Cs:Pb=2:1), дополненный совместным присутствием ПАВ, различных по природе (додециламина и олеиновой кислоты), и 1 мас. % НЦ в антирастворителе, обеспечивает эффективную пространственную и координационную изоляцию ионов свинца. Кислородсодержащие группы НЦ и амфифильные лиганды пассивируют центры кристаллизации, надежно блокируя спонтанную агрегацию прекурсоров на ранней стадии инжекции.

Это позволяет при нанесении раствора методом центрифугирования на подложку избежать агломерации и роста крупных кристаллов.

Исследование органо-неорганических перовскитов показало, что пленки исходного (немодифицированного) перовскита состава $CH_3NH_3PbI_2Cl$ имели черный цвет и состояли из мелких квадратных кристаллитов размерами 3,40–6,30 мкм с редкими промежутками между ними. Отдельные микрокристаллы собирались в частицы округлой формы диаметром до 9,0 мкм (рисунок 4 а).

В свежеприготовленном образце, модифицированном катионом аммония (NH_4^+) обнаружены многочисленные мелкие точечные и крупные листообразные кристаллиты длиной около 30 мкм, хаотично разбросанные по всей поверхности пленки черного цвета (рисунок 4 б).

При введении в перовскитный раствор катиона моноэтаноламмония ($HOC_2H_4NH_3^+$) пленка меняет цвет на темно-красный и уже имеет кристаллический характер с частицами эллипсоидной формы средних размеров 4,0×2,35 мкм^2 (рисунок 4 в).



а — исходный монохлорзамещенный перовскит; перовскиты, модифицированные при помощи катионов: б — аммониевого; в — моноэтаноламмониевого; г — фениламмониевого; д — этилендиаммониевого

Рисунок 4 — Структура поверхности пленок

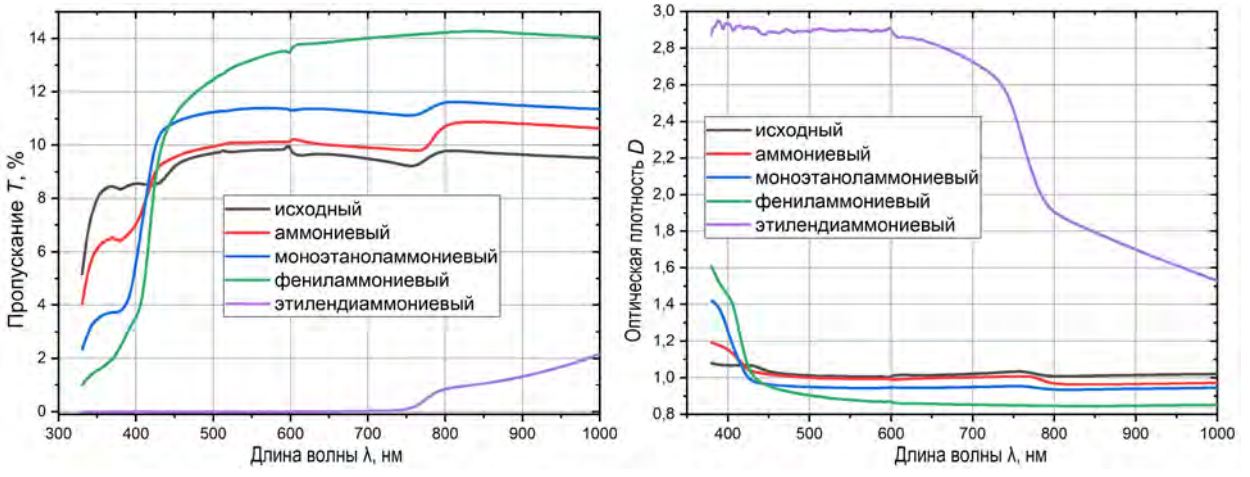
Содержание анилиновой соли (фениламмония йодида $C_6H_5NH_3I$) обеспечивает черный цвет пленок. Структура является микрокристаллической (округлые частицы размером 2,70–3,80 мкм, собранные воедино) со значительными промежутками (рисунок 4 г).

В случае введения катиона этилендиаммония ($IH_3NC_2H_4NH_3I$) покрытия приобретают красновато-черный цвет и зернистую сплошную структуру с размером частиц 0,92–1,37 мкм (рисунок 4 д).

Для перовскитов, модифицированных при помощи внедряемых солей, светопропускание повышается во всех случаях, кроме катиона этилендиаммония (рисунок 5 а).

При содержании катиона аммония в составе NH_4I после λ=418 нм пропускание повышается в среднем на T=0,652 % по сравнению с немодифицированным перовскитом. Для соли моноэтаноламина повышение происходит после λ=416 нм, светопропускание не превышает T=11,62 % при λ=806–822 нм. Самое высокое пропускание наблюдается при исследовании смешанного I/Cl перовскита с катионом фениламмония: при диапазоне λ=426–1000 нм светопропускание T=8,93–14,06 %. Для перовскита с катионом этилендиаммония ($^+H_3NC_2H_4NH_3^+$) медленный рост обнаруживается от T=0 % до T=0,10 % при λ 330–750 нм, после чего происходит скачок до T=0,80 % (λ=794 нм) с последующим плавным повышением до T=2,16 % (λ=1000 нм).

Оптическая плотность вышеуказанных образцов понижается во всех случаях, кроме перовскита с катионом этилендиаммония (рисунок 5 б). Для исходного образца показатель оптической плотности не падает ниже D=1,00 при λ=596 нм. Для перовскита с катионом аммония оптическая плотность изменяется неравномерно: понижение от D=1,19 (λ=380 нм) до D=0,99 (λ=604 нм) сменяется повышением (при λ=760 нм D=1,01), после которого падает до D=0,96 при λ=848 нм. При добавлении катиона моноэтаноламмония оптическая плотность резко падает от D=1,42 при λ=380 нм до D=0,94 при λ=568 нм, сопровождаясь дальнейшими незначительными колебаниями. Аналогичное поведение выявляется для перовскита с катионом фениламмония: оптическая плотность резко падает от D=1,61 при λ=380 нм до D=0,87 при λ=592 нм, в последующем диапазоне выявляются малые колебания. Для этилендиаммониевого включения во всей области видимого спектра оптическая плотность D понижается с двумя падениями при длинах волн λ=730 нм (D=2,63) и 790 нм (D=1,93), что соответствует красной области спектра. Максимальной оптическая плотность является в фиолетовой и синей областях спектра (λ=380–598 нм, D=2,88–2,91).



а б

а — пропускание; б — оптическая плотность

Рисунок 5 — Оптические спектры исходного и модифицированных аммонийными катионами монохлорзамещенных перовскитов

При поглощении солнечного света его энергия преобразуется в электричество. Увеличение показателя оптической плотности (*D*) при применении в составе фотовольтаических ячеек органо-неорганического перовскита, модифицированного этилендиаммониевым катионом, должно привести к росту эффективности преобразования энергии *(PCE — power conversion efficiency*). Данный параметр является показателем КПД перовскитного фотопреобразователя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований по формированию композитных пленок неорганического перовскита $CsPbI_3$, инкапсулированного в полимерную матрицу (ПИПМ), и изучению влияния модифицирующих добавок на качество пленок и оптические свойства монохлорзамещенного гибридного органо-неорганическиого перовскита состава $CH_3NH_3PbI_2Cl$ установлено следующее:

1. Модифицированным методом осаждения из жидкой фазы (в присутствии синергетической системы стабилизаторов (додециламин, олеиновая кислота) и ультрамалой добавки нитроцеллюлозы (1 мас. %)) успешно получены оптически активные прекурсорные растворы перовскита состава $CsPbI_3$ с избыточным содержанием цезия (Cs:Pb = 2:1).

2. Спектроскопия фотолюминесценции жидкой фазы (λ_{ex} 360 нм) позволила зафиксировать сосуществование растворимых молекулярных галогенидных комплексов свинца $[PbI_n]^{2-n}$ (пик 426 нм) и формирующейся квантово-размерной фазы наночастиц перовскита $\alpha CsPbI_3$ (полоса в области 685 нм). Установлено, что сильное визуальное зеленое свечение раствора под действием УФ-излучения обусловлено эффектом субтрактивной фильтрации света коричневато-янтарной матрицей прекурсора и зарождением наноструктур предположительного состава Cs_4PbI_6.

3. Методом сканирующей электронной микроскопии показано, что в процессе удаления растворителей при центрифугировании компоненты стабилизирующей системы и жесткие цепи нитроцеллюлозы обеспечивают селективную стерическую блокировку латеральных граней кристаллов. Это приводит к направленному одномерному (1*D*) росту и самосборке анизотропных наноструктур $CsPbI_3$ двух типов: изолированных параллельных «нанопалочек» и плотных пучков субмикронной толщины длиной 1,1–1,2 мкм.

4. Выявлено, что сформированные композитные пленки перовскита, инкапсулированного в полимерную матрицу толщиной 2,5–3,0 мкм, обладают развитой трехмерной пористой («губчатой») архитектурой, сформированной за счет локального фазового разделения при скоростном испарении антирастворителя, что открывает перспективы их применения в оптоэлектронных устройствах с развитой площадью гетероперехода.

5. В результате исследования влияния введения азотсодержащих катионов состава RNH_3^+ в жидкофазный прекурсор на структуру и оптические свойства пленок монохлорзамещенного гибридного органо-неорганическиого перовскита состава $CH_3NH_3PbI_2Cl$ установлено, что модификация перовскита катионом этилендиаммония приводит к повышению качества пленочных материалов. Помимо этого обнаружено, что в результате модификации органо-неорганического перовскита катионом этилендиаммония приводит во всей исследуемой области спектра к значительному снижению оптического пропускания и повышению оптической плотности по сравнению с остальными исследованными образцами.

Обнаруженные эффекты позволяют рассчитывать на то, что применение перовскита $CH_3NH_3PbI_2Cl$ в составе фотовольтаических ячеек позволит достичь высокой эффективности преобразования световой энергии в электрическую.

Работа выполнена при поддержке грантов Министерства образования 263086 М и 263090 М, Государственной программы научных исследований (ГПНИ) 2026–2030 «Фотоника и микроэлектроника» (задание 5.3.09) и гранта БРФФИ Т26КИ057.

ЛИТЕРАТУРА

1. Akkerman, Q. A. What Defines a Halide Perovskite? / Q. A. Akkerman, L. Mana // ACS Energy Lett. — 2020. — Vol. 5. — P. 604–610.

2. Photostability and photodegradation processes in colloidal $CsPbI_3$ perovskite quantum dots / R. An [et al.] // ACS : Applied materials & Interfaces — 2018. — Vol. 10, Iss. 45. — P. 39222–39227.

3. The Degradation and Blinking of Single Perovskite Quantum Dots / G. C. Yuan [et al.] // J. Phys. Chem. C. — 2018. — Vol. 122, Iss. 25. — P. 13407–13415.

4. McNelis, B. The Photovoltaic Business: Manufactures and Markets. / B. McNelis // Series on Photoconversion of Solar Energy. — 2001. — № 1. — P. 713.

5. Barboni, D. The Thermodynamics and Kinetics of Iodine Vacancies in the Hybrid Perovskite Methylammonium Lead Iodide / D. Barboni, R. A. De Souza // Energy Environ. Sci. — 2018. — Vol. 11. — P. 3266–3274.

6. Ching-Ho, T. Methylammonium halide salt interfacial modification of perovskite quantum dots/triple-cation perovskites enable efficient solar cells / T. Ching-Ho, L. Hong-Ye, L. Chen // Nature. — 2023. — Vol. 13, № 5387. — P. 13–20.

7. Eperon, G. The role of dimethylammonium in bandgap modulation for stable halide perovskites / G. Eperon // ACS Energy Lett. — 2020. — Vol. 5, № 6. — P. 1856–1864.

8. Seth, S. Facile Methodology for Engineering the Morphology of $CsPbX_3$ Perovskite Nanocrystals under Ambient Condition / S. Seth, A. Samanta // Scientific Reports. — 2016. — № 6. — Article number: 37693.

9. Deposition, Morphology and Composition of Perovskite $CsPb(Br_{1-x}I_x)_3$ / U.Turavets [et al.] // 2024 IEEE 24th International Conference on Nanotechnology (NANO). — IEEE, 2024. — P. 297–301.

REFERENCES

1. Akkerman Q. A., Mana L. What Defines a Halide Perovskite? // ACS Energy Lett, 2020, vol. 5, pp. 604–610.

2. An R. [et al.] Photostability and photodegradation processes in colloidal $CsPbI_3$ perovskite quantum dots // ACS : Applied materials & Interfaces, 2018, vol. 10, iss. 45, pp. 39222–39227.

3. Yuan G. C. [et al.] The Degradation and Blinking of Single Perovskite Quantum Dots // J. Phys. Chem. C., 2018, vol. 122, Iss. 25, pp. 13407–13415.

4. McNelis. B. The Photovoltaic Business: Manufactures and Markets // Series on Photoconversion of Solar Energy. 2001, № 1, p. 713.

5. Barboni D., De Souza R. A. The Thermodynamics and Kinetics of Iodine Vacancies in the Hybrid Perovskite Methylammonium Lead Iodide // Energy Environ. Sci. 2018, vol. 11, pp. 3266–3274.

6. Ching-Ho T., Hong-Ye L., Chen L. Methylammonium halide salt interfacial modification of perovskite quantum dots/triple-cation perovskites enable efficient solar cells // Nature. 2023, vol. 13, № 5387, pp. 13–20.

7. Eperon G. The role of dimethylammonium in bandgap modulation for stable halide perovskites // ACS Energy Lett. 2020, vol. 5, № 6, pp. 1856–1864.

8. Seth S., Samanta A. Facile Methodology for Engineering the Morphology of $CsPbX_3$ Perovskite Nanocrystals under Ambient Condition // Sci. Rep. 2016, № 6, Article number: 37693.

9. Turavets U. [et al.] Deposition, Morphology and Composition of Perovskite $CsPb(Br_{1-x}I_x)_3$ // 2024 IEEE 24th International Conference on Nanotechnology (NANO). IEEE, 2024, pp. 297–301.

Статья поступила в редакцию 18.05.2026